

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

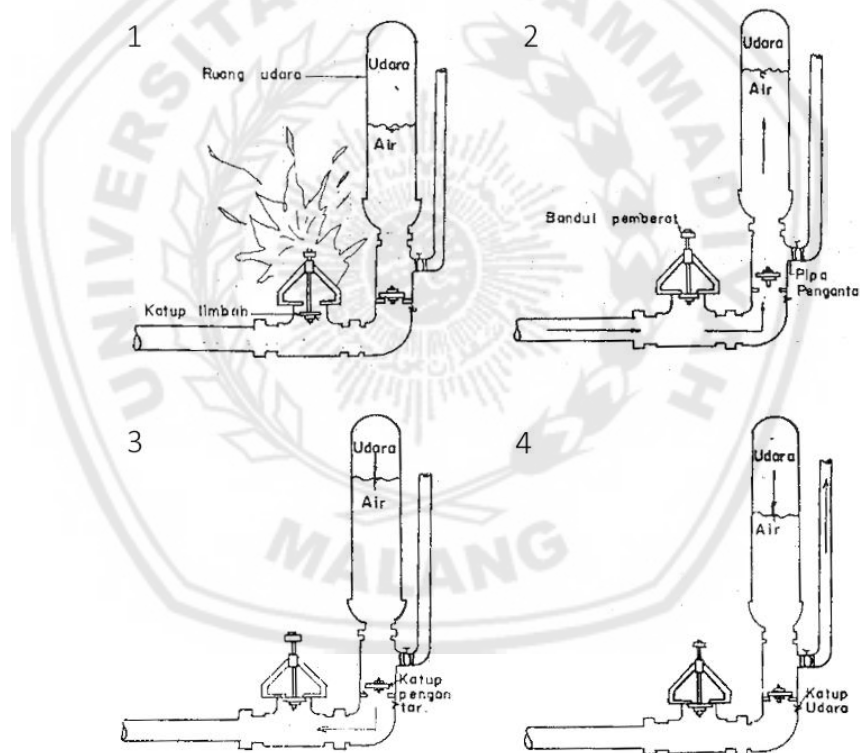
2.1 Pengertian Umum Pompa Hidrolik Ram

Pompa hidrolik ram atau bisa disebut juga sebagai pompa hidram adalah pompa yang sudah digunakan lebih se abad, yang berfungsi untuk menaikkan air melebihi 100 meter. Pompa ini sederhana dan efektif digunakan pada kondisi sesuai dengan syarat-syarat yang diperlukan untuk operasinya. Dalam kerjanya alat ini, tekanan dinamik air yang ditimbulkan memungkinkan air mengalir dari tinggi vertikal (*head*) yang rendah ke tempat yang lebih tinggi. Penggunaan hidram tidak terbatas hanya pada penyediaan air untuk kebutuhan rumah tangga, tapi juga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan air untuk pertanian, peternakan dan perikanan darat. Di beberapa daerah pedesaan di Jepang alat ini telah banyak digunakan sebagai alat penyediaan air untuk kegiatan pertanian maupun untuk keperluan domestik.

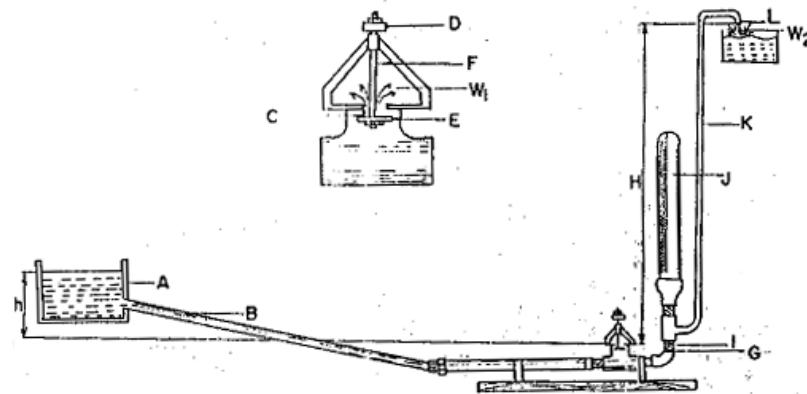
Dalam operasinya, alat ini mempunyai keuntungan dibandingkan dengan jenis pompa lainnya, antara lain; tidak membutuhkan sumber tenaga tambahan, biaya operasinya murah, tidak memerlukan pelumasan, hanya mempunyai dua bagian yang bergerak sehingga memperkecil terjadinya keausan, perawatannya sederhana dan dapat bekerja dengan efisien pada kondisi yang sesuai serta dapat dibuat dengan peralatan bengkel yang sederhana.

Prinsip kerja pompa hidram adalah merupakan perubahan energi atau konversi energi dari energi kinetik aliran air menjadi tekanan dinamik dan sebagai akibatnya menimbulkan palu air (*water hammer*) sehingga terjadi tekanan tinggi dalam pipa.

Dengan mengusahakan supaya katup limbah (*waste valve*) dan katup pengantar (*delivery valve*) terbuka dan tertutup secara bergantian, maka tekanan dinamik diteruskan sehingga tekanan inersia yang terjadi dalam pipa pemasukan memaksa air naik ke pipa pengantar (gambar 2.1). Bagian bagian utama yang menyusun alat ini terdiri dari pipa pemasukan (*drive pipe*), pipa pengeluaran atau pipa pengantar (*delivery pipe*), katup limbah (*waste valve*), katup pengantar (*delivery valve*), katup udara (*air valve*) dan ruang udara (*air chamber*), (Hanafie; 1979).



Gambar 2.1, Kerja pompa hidram (*ram pump*).



Keterangan

- A. Tangki pemasukan
- B. Pipa pemasukan
- C. Lubang katup limbah
- D. Pemberat katup limbah
- E. Katup limbah
- F. Tangkal katup limbah
- G. Katup udara
- I. Katup pengantar
- J. Ruang udara
- K. Pipa pengantar
- L. Lubang pengeluaran pipa pengantar
- H. Tinggi vertikal antara lubang katup limbah dengan lubang pengeluaran pipa pengantar
- h. Tinggi vertikal antara permukaan air dalam tangki pemasukan dengan lubang katup limbah
- W₁ Debit air yang terbuang melalui katup limbah
- W₂ Debit pompa

Gambar 2.2, Instalasi pompa hidram.

2.2 Mekanisme *Hydraulic Ram Pump*

Air mengalir dari suatu sumber atau sebuah tangki melalui pipa pemasukan dan keluar melalui katup limbah (*waste valve*). Aliran air yang keluar melalui katup limbah cukup cepat, maka tekanan dinamik yang merupakan gaya ke atas mendorong katup limbah sehingga tertutup secara tiba-tiba sambil menghentikan aliran air dalam pipa pemasukan (*drive pipe*). Aliran air yang terhenti mengakibatkan tekanan tinggi terjadi secara tiba-tiba dalam ram, jika tekanan cukup besar akan mengatasi tekanan dalam ruang udara (*air chamber*) pada katup pengantar (*delivery valve*) dengan demikian membiarkan air mengalir ke dalam ruang udara dan seterusnya ke tangki penampungan.

Gelombang tekanan atau “*hammer*” dalam ram sebagian dikurangi dengan lolosnya air ke dalam ruang udara dan denyut tekanan melompat kembali ke pipa pemasukan mengakibatkan hisapan di dalam badan ram. Hal ini menyebabkan katup pengantar menutup kembali dan menghalangi mengalirnya air kembali ke dalam ram. Katup limbah turun atau terbuka dan air sumber air melalui pipa pemasukan mengalir ke luar dan siklus tadi terulang lagi.

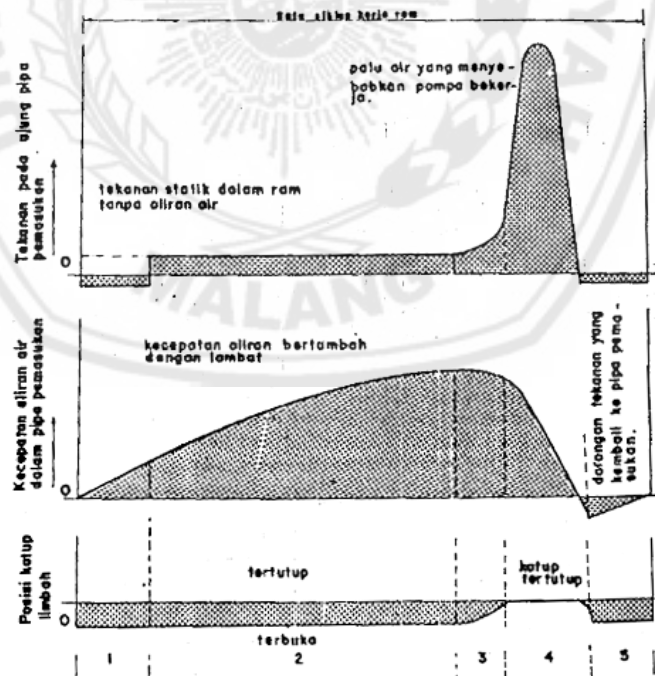
Sejumlah kecil udara masuk melalui katup udara (*air valve*) selama terjadi hisapan pada siklus tersebut. Air masuk ke dalam ruang udara melalui katup pengantar pada setiap gelombang air yang masuk ke dalam ruang udara. Ruang udara diperlukan untuk meratakan perubahan tekanan yang drastis dalam hidram. Udara dimampatkan dalam ruang dan secara kontinyu terjadi pergantian dengan udara baru yang masuk melalui katup udara, sebab ada sebagian udara yang telah dimampatkan bersama dengan air ke luar melalui pipa pengantar, dan selanjutnya ke tangki penampungan.

Dengan mengatur berat katup limbah dan jarak antara lubang katup dengan lubang limbah, di harapkan hidram dapat memompa air sebanyak mungkin dan biasanya terjadi bila siklus kira-kira 75 kali tiap menitnya. Pada gambar 2.3 diperlihatkan diagram siklus yang menunjukkan satu siklus denyut tekanan dari hidram.

- Periode 1. Akhir siklus yang sebelumnya, kecepatan air melalui ram mulai bertambah, air melalui katup limbah yang sedang terbuka, timbul tekanan negative yang kecil dalam hidraulik ram.
- Periode 2. Aliran bertambah sampai maksimum melalui katup limbah yang terbuka dan tekanan dalam pipa pemasukan juga bertambah secara bertahap.

- Periode 3. Katup limbah mulai menutup dengan demikian menyebabkan naiknya tekanan dalam hidraulik ram. Kecepatan aliran dalam pipa pemasukan telah mencapai maksimum.
- Periode 4. Katup limbah tertutup, menyebabkan terjadinya palu air (*water hammer*) yang mendorong air melalui katup pengantar. Kecepatan aliran pipa pemasukan berkurang dengan cepat.
- Periode 5. Denyut tekanan terupukul ke dalam pipa pemasukan, menyebabkan timbulnya hisapan kecil dalam hidraulik ram. Katup limbah terbuka karena hisapan tersebut dan juga karena beratnya sendiri. Air mulai mengalir lagi melalui katup limbah dan siklus hidraulik ram terulang lagi.

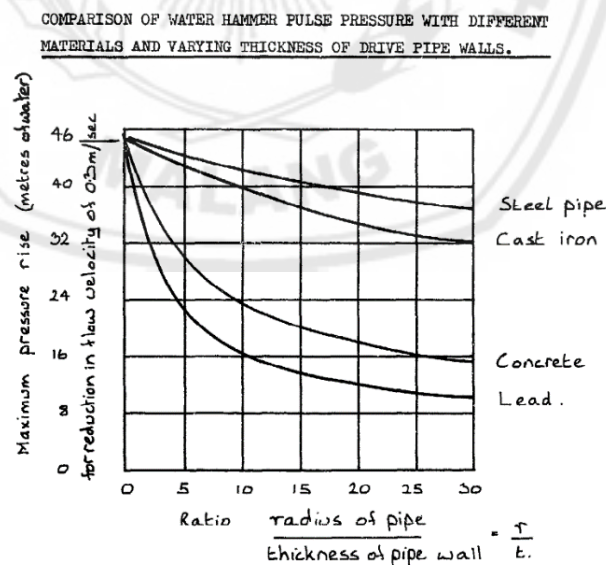
(Hanafie; 1979)



Gambar 2.3, Diagram satu siklus kerja pompa hidram.

2.3 Bagian-Bagian *Hydraulic Ram Pump*

Dalam konstruksi pompa hidram, ada beberapa bagian atau komponen pada pompa yang sangat menentukan bisa atau tidaknya pompa bekerja sesuai dengan syarat syarat yang ada dilingkungan pemasangan pompa. Bagian bagian pompa harus memiliki akurasi yang baik agar pompa hidram dapat bekerja dengan efisiensi yang sesuai karakteristiknya. Selain itu bahan atau material dari pompa hidram juga sangat signifikan dalam mempengaruhi efisiensi pompa, semakin kaku atau *rigid* bahan maka efisiensi pompa tidak tereduksi. Bahan yang memiliki sifat elastis dapat mereduksi kecepatan aliran air sekitar 0,3 m/s dalam kasus ini dapat menurunkan tekanan hingga 4,6 kg/cm² (Grafik 2.1). Adapun bagian bagian penting pompa hidraulik ram yang paling menentukan beroperasinya pompa adalah pipa pemasukan (*drive pipe*), pipa penghantar (*delivery pipe*), rumah pompa, katup penghantar (*delivery valve*), katup limbah (*waste valve*), lubang udara dan tabung udara (*air chamber*) (Hanafie; 1979).



Grafik 2.1, Perbandingan tekanan disebabkan perbedaan material.

2.4 Mekanika Fluida

Mekanika fluida merupakan salah satu cabang tertua dari ilmu fisika dan merupakan pondasi bagi pengetahuan dan aspek lain ilmu terapan dan keteknikan (*engineering*) yang memperhatikan gerakan dan keseimbangan fluida. Ilmu ini merupakan suatu subjek yang mendasari hampir semua bidang keteknikan seperti; teknik mesin, teknik sipil, *aerospace*, perkapalan, *marine engineering* serta bidang-bidang lain seperti; *astrophysics*, biologi, *biomedicine*, *plasma-physics*.

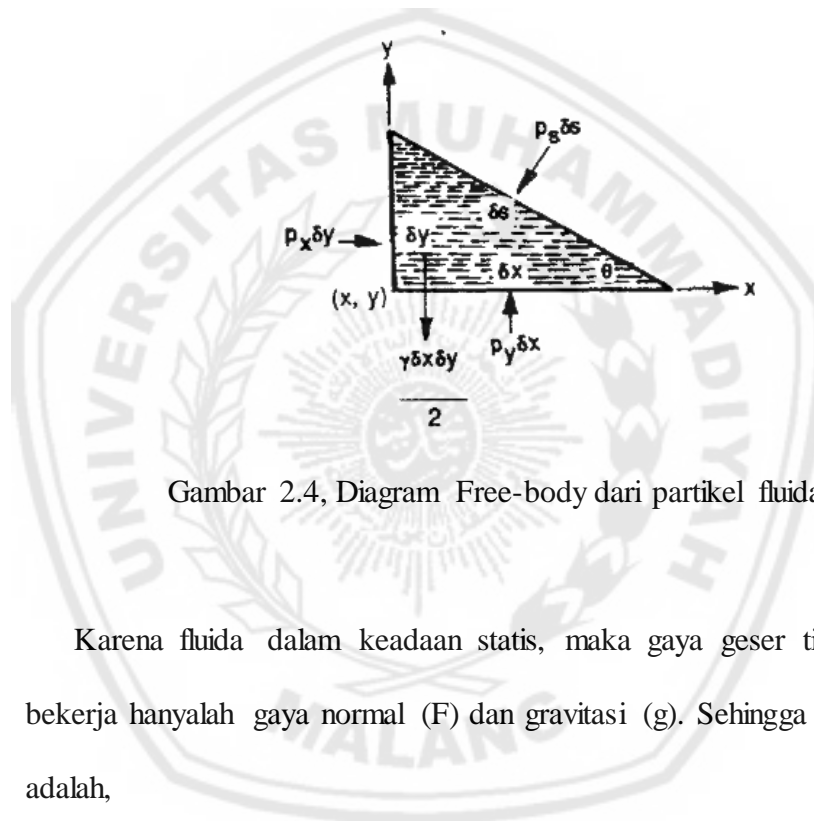
Studi mengenai seluruh aspek tingkah laku fluida kemudian dapat dibagi menjadi tiga kategori; statika fluida, kinematika fluida dan dinamika fluida. Pada kasus pertama, elemen fluida berada pada keadaan relative terhadap lainnya sehingga bebas dari tegangan geser (*shear stress*). Distribusi-distribusi tekanan statis dalam suatu fluida dan pada benda benda yang tenggelam didalam suatu fluida dapat ditentukan dari analisa statika.

Kinematika fluida berhubungan dengan studi mengenai translasi, rotasi dan rate deformasi dari suatu partikel fluida. Analisa ini berguna dalam menentukan metode yang menggambarkan gerakan suatu partikel dan dalam menganalisa bentuk aliran. Selanjutnya, perlu untuk mengadakan Analisa dinamis bagi suatu gerakan fluida untuk menentukan efek-efek fluida tersebut beserta lingkungannya terhadap gerakan.

Analisa dinamis meliputi pertimbangan terhadap gaya-gaya yang bekerja pada partikel-partikel fluida yang bergerak. Karena adanya gerakan relatif daripada partikel-partikel, maka gaya-gaya geser menjadi penting dalam Analisa tersebut, (Orianto; 1989).

2.4.1 Tekanan pada suatu titik

Tekanan rata-rata adalah pembagian dari gaya normal terhadap luasannya. Sedangkan tekanan pada suatu titik merupakan suatu limit dari perbandingan gaya normal terhadap luasannya, dimana luasan tersebut mendekati nol. Pada suatu titik pada fluida yang diam, tekanan pada seluruh arah adalah bernilai sama, (Orianto; 1989).



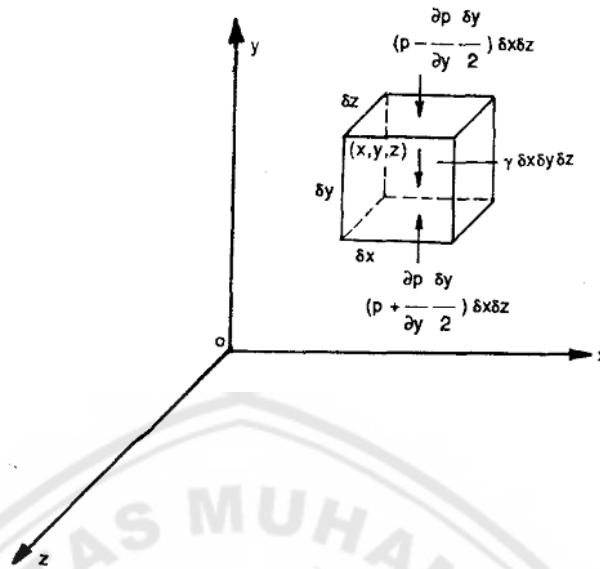
Gambar 2.4, Diagram Free-body dari partikel fluida.

Karena fluida dalam keadaan statis, maka gaya geser tidak ada, yang bekerja hanyalah gaya normal (F) dan gravitasi (g). Sehingga persamaannya adalah,

$$P_s = P_x = P_y \quad (1)$$

2.4.2 Variasi tekanan pada fluida statis

Gaya-gaya yang bekerja pada suatu elemen fluida yang diam, terdiri dari gaya-gaya permukaan dan *body force*. Dalam hal ini *body force*-nya adalah; $-\gamma \delta x \delta y \delta z$ pada arah negatif γ .



Gambar 2.5, Permodelan variasi tekanan pada fluida menggunakan partikel.

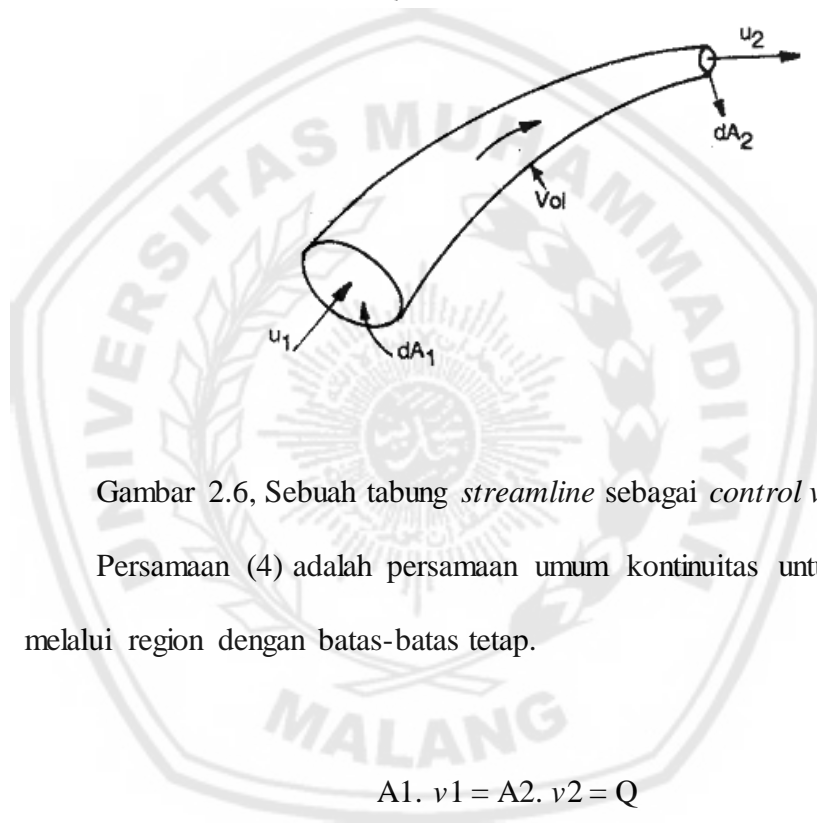
Karena fluida dalam keadaan statis, maka gaya geser tidak ada, yang bekerja hanyalah gaya normal (F) dan gravitasi (g). Sehingga persamaannya adalah,

$$P = \gamma h \quad (2)$$

Di mana γ adalah berat jenis fluida yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan h diukur secara vertikal ke bawah ($h = -y$) dari suatu permukaan fluida bebas dan P adalah pertambahan tekanan dari tekanan pada permukaan bebas, (Orianto; 1989).

2.4.3 Persamaan Kontinuitas

Gambar 2.9 memperlihatkan suatu tabung yang pendek, yang bisa diasumsikan untuk maksud maksud praktek, sebagai suatu kumpulan *streamline-streamline*.



Gambar 2.6, Sebuah tabung *streamline* sebagai *control volume*.

Persamaan (4) adalah persamaan umum kontinuitas untuk aliran yang melalui region dengan batas-batas tetap.

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = Q \quad (3)$$

Yang merupakan persamaan kontinuitas untuk fluida *incompressible*, aliran tetap dan tak tetap, di dalam batas-batas yang tetap, (Orianto; 1989).

2.4.5 Persamaan Bernoulli

Persamaan asas Bernoulli adalah perkiraan hubungan antara tekanan, kecepatan, dan elevasi atau ketinggian, juga fluida yang stabil (*steady region*), properties aliran fluida tak-termampatkan (*incompressible fluid flows*). Meskipun sederhana, namun ini terbukti sangat berguna dalam pengetahuan atau subjek mekanika fluida. Kunci dari persamaan Bernoulli adalah tentang efek viskositas yang diabaikan, pengaruh gravitasi, dan tekanan yang terjadi terhadap fluida. Sejak semua fluida memiliki viskositas, penggunaan persamaan Bernoulli kemudian tidak dapat digunakan untuk semua jenis fluida. Bagaimanapun masih persamaan Bernoulli dapat digunakan di beberapa wilayah yang pasti untuk praktik tentang aliran fluida.

Aliran tak-termampatkan adalah aliran fluida yang dicirikan dengan tidak berubahnya besaran kerapatan massa (densitas) dari fluida di sepanjang aliran tersebut. Contoh fluida tak-termampatkan (*incompressible fluids*) adalah: air, berbagai jenis minyak, emulsi, dan lain-lain, (Wikipedia; 2007).

Bentuk Persamaan Bernoulli untuk aliran tak-termampatkan adalah sebagai berikut:

$$P + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{Konstan} \quad (4)$$

di mana:

v = kecepatan fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

h = ketinggian relatif terhadap suatu referensi (m)

P = tekanan fluida (kg/m^2)

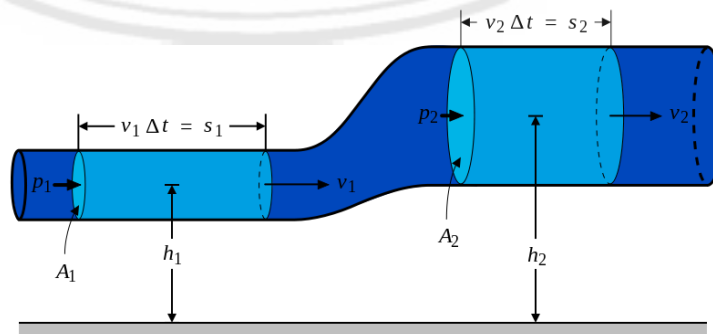
ρ = Massa Jenis fluida (kg/m^3)

Persamaan di atas berlaku untuk aliran tak-termampatkan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Aliran bersifat stabil (*steady state*)
- Tidak terdapat gesekan

Dalam bentuk lain yaitu pada tekanan, tinggi dan kecepatan aliran fluida yang berbeda di saluran yang berbeda (gambar 2.10), persamaan Bernoulli dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (5)$$



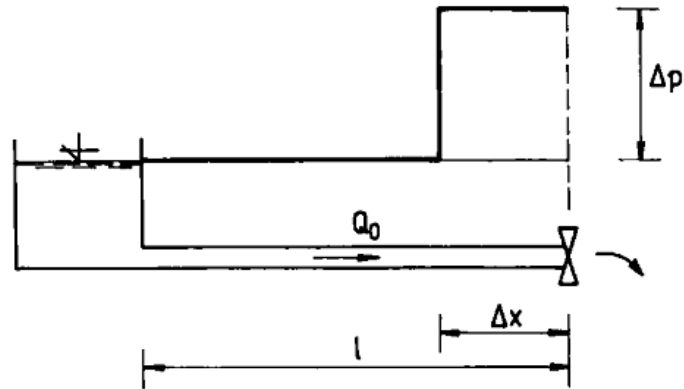
Gambar 2.7, Permodelan asas Bernoulli.

2.4.6 Palu air (*water hammer*)

Bayangkan dalam sebuah sistem perpipaan, pipa yang terisi fluida mengalir didalamnya. Sistem perpipaan dapat memiliki berbagai macam perangkat, seperti katup, pompa, *reservoir*, tangki, *inlet* udara, dll yang mana perangkat perangkat ini dapat mempengaruhi aliran fluida.

Aliran fluida terkhusus pada fluida tak termampatkan (*incompressible fluid*) dalam pipa dapat dalam keadaan stabil/laminar atau tidak stabil/turbulen. Pada aliran yang stabil, aliran tidak ada perubahan fenomena terhadap waktu. Tapi biasanya aliran yang memiliki beragam perubahan properti nilai tekanan dan kecepatan adalah saat aliran kondisi turbulen atau tidak stabil.

Aliran turbulen atau aliran yang tidak stabil dapat menghasilkan perubahan cepat tekanan dan kecepatan fluida, fenomena perubahan cepat pada properti fluida air ini umumnya disebut sebagai palu air atau *water hammer*. Dalam fenomena *water hammer*, dapat diasumsikan beberapa pendukung penyebab dapat timbulnya *water hammer* yaitu sifat fluida yang harus bersifat tak termampatkan (*incompressible fluids*) dan kekakuan atau rigiditas bahan dari saluran pipa. Untuk persamaan yang digunakan dalam menghitung atau menentukan nilai tekanan palu air atau *water hammer* yang terjadi khusus pada fluida tak termampatkan, memiliki 2 cara yaitu menggunakan persamaan milik Joukowsky dan metode numerik.



Gambar 2.8, Permodelan terjadinya *water hammer* pada saluran pipa dengan katup yang ditutup secara cepat pada hilir saluran.

Adapun persamaan milik joukowsky yang mana di perlukan dalam menentukan nilai kecepatan gelombang supersonic dapat di rumuskan oleh persamaan di bawah.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6)$$

K adalah modulus bulk fluida, ρ merupakan massa jenis fluida dan c adalah kecepatan gelombang supersonic yang ada selama *water hammer* terjadi. Tabel 4 di bawah ini adalah angka atau nilai standard dari modulus bulk, massa jenis juga kecepatan gelombang supersonik.

Tabel 2.1: Angka standar modulus bulk (K), massa jenis fluida (ρ) dan kecepatan supersonik (c)

Liquid	K (Pa)	ρ (kg m^{-3})	c (m s^{-1})
water 0 °C	1.89×10^9	1000	1375
water 10 °C	1.96×10^9	1000	1400
water 20 °C	2.03×10^9	998	1426
water 40 °C	2.18×10^9	992	1482
sea water 0 °C 3.5 % salt	2.04×10^9	1028	1408
kerosene	1.3×10^9	670–760	1307–1393
petroleum	1.5×10^9	830–840	1336–1344
oil	1.1×10^9 – 1.6×10^9	855–963	1134–1288

Di karenakan elastitas dari saluran pipa, kecepatan gelombang supersonic dalam pipa dapat terpengaruh dan berkurang dikarenakan kurang kaku atau rigidnya pipa.

Kemudian untuk pipa yang memiliki ketebalan yang tipis, kecepatan gelombang supersonik dalam memiliki persamaan sebagai berikut,

$$c = \sqrt{\frac{K_e}{\rho}} \quad (7)$$

Di mana,

$$K_e = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{D}{eE}} \quad (8)$$

Di mana e adalah ketebalan dinding saluran pipa dan E adalah modulus elastitas bahan dari saluran pipa. Tabel 5 memberikan angka angka standar untuk berbagai variasi modulus elastitas dari beberapa material.

Tabel 2.2: Modulus elastisitas bahan pada beberapa material.

Conduit material	E (Pa)
steel	$2.0 \times 10^{11} - 2.2 \times 10^{11}$
grey cast iron	$4.4 \times 10^{10} - 1.2 \times 10^{11}$
aluminium	7.3×10^{10}
copper	1.2×10^{11}
lead	$5 \times 10^9 - 1.7 \times 10^{10}$
glass	$5 \times 10^{10} - 8 \times 10^{10}$
wood	$9 \times 10^9 - 1.3 \times 10^{10}$
rubber	$2 \times 10^5 - 6 \times 10^5$
concrete	$2 \times 10^{10} - 3 \times 10^{10}$
asbestos cement	2.5×10^{10}

Kecepatan gelombang supersonik untuk fluida air misalkan ($K = 1,96 \times 10^9 \text{ Pa}$, $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$) dalam berbagai jenis material atau bahan, dapat di hitung menggunakan persamaan (7) dan (8). Tabel 6 adalah contoh hasil kecepatan gelombang supersonik khusus pada fluida air, (Zabura.J; 1993).

Tabel 2.3: Berbagai hasil kecepatan supersonik fluida air, dengan berbagai macam modulus elatisitas bahan.

Conduit material	$D \text{ (m)}$	$e \text{ (m)}$	$E \text{ (Pa)}$	$c \text{ (m s}^{-1}\text{)}$
steel	0.04	0.01	2.1×10^{11}	1374
steel	0.12	0.01	2.1×10^{11}	1328
steel	0.40	0.01	2.1×10^{11}	1195
steel	1.20	0.01	2.1×10^{11}	961
steel	0.40	0.005	2.1×10^{11}	1059
steel	0.40	0.02	2.1×10^{11}	1285
steel	0.40	0.03	2.1×10^{11}	1320
cast iron	0.12	0.01	1.0×10^{11}	1259
asbestos	0.12	0.01	2.5×10^{10}	1004
cement				
rubber	0.12	0.01	1.0×10^5	2.9

2.5 Metode Karakteristik (*Method of Characteristics*)

Metode karakteristik umumnya menjadi metode pilihan untuk menganalisa fenomena *water hammer*. Analisa numerik ini paling universal digunakan, teori dari metode karakteristik berkaitan dengan aplikasi sebuah kasus pada sistem yang terdiri dari beberapa perangkat yaitu reservoir, sistem saluran pipa dan katup. Kecepatan (v) dan tekanan (P) fluida adalah dua variabel independen yang penting penggunaannya dalam metode ini. Metode karakteristik sebenarnya adalah transformasi dari persamaan

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + g \cdot \sin(a) + \frac{f \cdot v \cdot |v|}{2 \cdot D} = 0 \quad (9)$$

differential parsial yang terdiri atas persamaan gerak/momentum Euler dan persamaan kontinuitas yang kemudian menjadi sistem persamaan differential biasa atau *ordinary*.

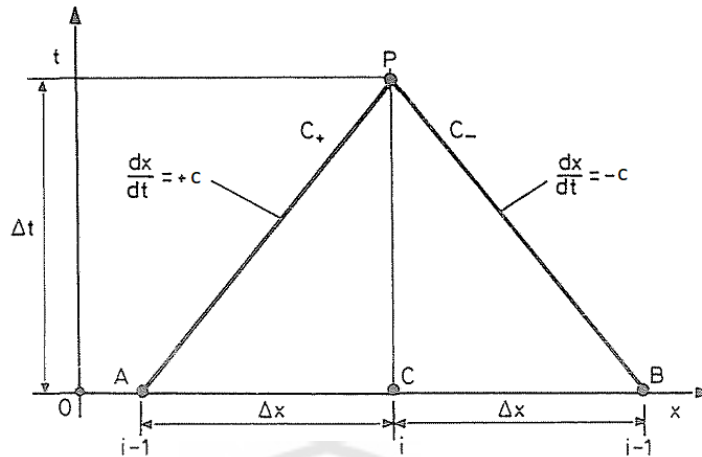
$$\frac{dP}{dt} + \rho \cdot c^2 \cdot \frac{dv}{dx} = 0 \quad (10)$$

Persamaan (9) adalah persamaan gerak/momentum Euler dan persamaan (10) adalah persamaan kontinuitas, yang terdiri dari kecepatan (v), tekanan (P), gravitasi (g), massa jenis fluida (ρ), koefisien Darcy Vayzbakh (f) dan kecepatan gelombang supersonic (c). Dua persamaan (10) dan (11) adalah bentuk dari persamaan differential parsial, sehingga untuk menyederhanakan kedua persamaan ini dapat di kombinasikan dan dijadikan sistem persamaan differential biasa.

Diasumsikan jika persamaan (9) adalah “L1” dan persamaan (10) adalah “L2”, maka dapat dikombinasikan menjadi persamaan,

$$L = L1 + (\pm\lambda).L1 \quad (11)$$

Hasil dari persamaan (11) atau hasil dari persamaan “L”, adalah bentuk hasil penyederhanaan dan menjadi sistem persamaan differential biasa atau *ordinary*. Variable “ λ ” pada persamaan (11) memberikan 2 sesi sistem persamaan differential biasa, satu untuk nilai positif ($C+$) dan satu untuk nilai negatif ($C-$), sehingga dapat dibuat grafik seperti pada Grafik 2.2 yaitu grafik perubahan tekanan (P) terhadap waktu (t) dan jarak (x).



Grafik 2.2, Grafik x-t

Dan persamaan (9) dan (10) dapat dimasukan kedalam persamaan (11), sehingga bentuk persamaan barunya dapat dituliskan, jika $\lambda = \pm \frac{1}{p.c}$.

$$L = \frac{dv}{dt} \pm \frac{1}{\rho.c} \cdot \frac{dP}{dt} + g.\sin(a) + \frac{f.v.|v|}{2.D} = 0 \quad (12)$$

Persamaan (12) dapat dikalikan dengan $\rho.c.dt$, yang akan menjadi lebih sederhana dan dapat di integralkan.

$$(\rho.c.dv) \pm (dP) + (g.\sin(a).\rho.dt) + (\rho.dx.\frac{f.v.|v|}{2.D}) = 0 \quad (13)$$

Pada Grafik 2.2, ada 2 bagian yang berbentuk segitiga siku-siku yaitu bagian AP(+) dan PB(-), persamaan (13) kemudian dapat dijadikan patokan untuk dua bagian tersebut sebagai parameter integral.

$$\int_A^P \rho.c.dv + \int_A^P dP + \int_A^P g.\sin(a).\rho.dt + \int_A^P \rho.dx.\frac{f.v.|v|}{2.D} = 0 \quad (14)$$

$$\int_B^P \rho \cdot c \cdot dv - \int_B^P dP + \int_B^P g \cdot \sin(a) \cdot \rho \cdot dt + \int_B^P \rho \cdot dx \cdot \frac{f \cdot v \cdot |v|}{2 \cdot D} = 0 \quad (15)$$

Jika dimana persamaan (14) dan (15) menggunakan pendekatan $\int_A^P v |v| dx = \Delta x |v_A| v_p$ dan $\int_B^P v |v| dx = \Delta x |v_B| v_p$ maka persamaan untuk menentukan tekanan dan kecepatan pada fenomena *water hammer* menggunakan persamaan (16) dan (17) dibawah ini:

$$\rho \cdot c \cdot (v_p - v_A) + (P_p - P_A) + \rho \cdot g \cdot \sin(a) \cdot \Delta x + \frac{\rho \cdot \Delta x \cdot f \cdot |v_A| v_p}{2 \cdot D} = 0 \quad (16)$$

$$\rho \cdot c \cdot (v_p - v_B) - (P_p - P_B) + \rho \cdot g \cdot \sin(a) \cdot \Delta x + \frac{\rho \cdot \Delta x \cdot f \cdot |v_B| v_p}{2 \cdot D} = 0 \quad (17)$$

(Victor; 1988).